

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 533.9: 621.793.14.74

В.І. Копилов, І.В. Смирнов, І.А. Селіверстов

ПРОЦЕСИ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ПЛАКУВАННЯ ПОРОШКІВ ДЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

Вступ

Згідно з тенденцією розвитку сучасних технологій щодо розробки високоякісних композиційних матеріалів і покриттів з комплексом підвищених фізико-механічних характеристик, актуальним є створення нових порошків, на основі яких формуються такі композиції.

Існують різноманітні технології одержання композиційного порошку, в тому числі й з плакованою оболонкою [1, 2]. Такі способи плакування порошків мають свої переваги і недоліки. Наприклад, поверхнєве електролітичне осадження металів не дає можливості безпосередньо плакувати неелектропровідні порошки, оскільки потрібна попередня металізація їх іншими способами. Виключається також можливість плакування порошків карбідами, нітридами та іншими твердими сполуками. Хімічна металізація порошків дозволяє формувати одно- і багатокомпонентні шари на різних порошкових матеріалах. Недоліком цього способу є необхідність промивання і сушіння порошків. Така технологія, як карбонільна технологія нікелювання порошків ефективніша за швидкістю осадження, ніж процес хімічного нікелювання, але складніша в апаратному оформленні. Крім того, ці методи не забезпечують екологічну чистоту, високу хімічну чистоту осаду і надійне зчеплення металевої оболонки з частинкою — ядром порошку.

Альтернативою хімічним і гальванічним методам на сьогодні є сучасний золь-гель-процес модифікування порошків із своїми особливостями [3]. При золь-гель-технології вихідні компоненти повинні перебувати в рідкому стані або являти собою розчини необхідних твердих сполук. Для отримання колоїдних розчинів (золів) і їх структуроутворення необхідне ретельне змішування при правильному виборі дозування. Процес ускладнюється подальшою сушкою, видаленням вологи і вибором режимів відпалу.

Зазначених недоліків значною мірою позбавлені способи випару і конденсації металів у

вакуумі [4–6]. Методи вакуумної металізації завдяки своїй універсальності відкривають можливості одержання нових видів композиційних матеріалів і покриттів. Однак для плакування порошків не всі методи вакуумної металізації можна застосовувати. Наприклад, такий ефективний метод нанесення покриттів, як електронно-променеве випаровування [6] для плакування порошків не знайшов істотного поширення.

Серед вакуумних методів відомий метод магнетронного розпилення, основними перевагами якого є наявність іонної компоненти в масопотоці та низька температура підкладки [7, 8]. Магнетронний метод дає змогу отримати товщину оболонки до 2000Å на кожному зерні порошку з високою адгезією, але така незначна частка металевого конденсату знижує ефективність створюваної композиції при розробці керамічних матеріалів і покриттів [7]. Наприклад, при формуванні газотермічних покриттів тонка оболонка під дією високотемпературного і високошвидкісного плазмового потоку згортається і відшаровується з поверхні порошків, що обмежує застосування композиту.

Серед поширених вакуумних технологій конденсації металевих плівок особливе місце посідає метод іонно-плазмового розпилення металів в умовах дугового розряду [9–13]. Цей перспективний, розроблюваний метод плакування порошків завдяки своїм фізико-технологічним можливостям дає змогу забезпечувати рівномірну металеву оболонку з високими швидкостями осадження і часткою металевого конденсату до 25 %. При цьому можна формувати складні композиції кераміки з різними зв'язками, в тому числі й при пошаровому осадженні різних металів.

Такі можливості дозволяють застосовувати плаковані порошки для різних цілей: створення нових хімічних каталізаторів; одержання композиційних матеріалів пресуванням і спіканням композиційних порошків, наприклад, для виготовлення різального інструменту; одержання псевдосплавів з підвищеними властивостями на міцність, зокрема сплавів на основі алюмінію з дисперсним зміцненням плакованими частинками; отримання композиційних пластмас; створення газотермічних та інших покриттів із спеціальними властивостями [13]. Крім того, при вакуумно-дуговому плакуванні можна переміщувати і перемішувати порошок за допомогою вібраційних пристроїв [12].

Однак зараз ще недостатньо вивчені питання активності і взаємодії плазмового металевого потоку з поверхнею оброблюваної порошкової маси. Подальше розроблення порошкових композиційних матеріалів потребує досліджень процесів у самій металевій плазмі, фізичних процесів на атомно-молекулярному рівні на поверхні частинок порошку при їх взаємодії з компонентами цієї плазми, що зумовлює визначення раціональних технологічних режимів процесу плакування.

Дослідження з удосконалення і оптимізації технологічних процесів вакуумно-конденсційного осадження плівок на порошкові суміші є актуальними, вони направлені на створення якісного плакованого порошкового матеріалу для подальшого його використання, в тому числі і для газотермічного напилювання покриттів різноманітного функціонального призначення.

Постановка задачі

Метою даної статті є вивчення параметрів металеві плазми, що генерується вакуумною дугою, і процесів формування металеві оболонки на частинках керамічних порошків, призначених для створення ефективних захисних газотермічних покриттів.

Методика експерименту і досліджень

Об'єктом дослідження були порошки оксиду алюмінію діаметром 40–60 мкм, плаковані титаном і алюмінієм. Їх застосування для плазмового напилювання підвищує комплекс фізико-механічних характеристик покриттів при роботі в умовах корозійного впливу, дії інтенсивних температурних полів, навантажень та протидії зношуванню.

Для визначення параметрів плазми вимірювання проходило за допомогою циліндричного зонда діаметром 2 мм. Плакування порошків і дослідження металеві плазми проводилося на установці іонно-плазмового напилювання "Анга-1" за наведеною на рис. 1 схемою [14]. Електричний зонд 1 встановлювався в середині камери напилювання 2 діаметром 700 мм на різній відстані L від джерела генерації плазми (катода) 3 до підкладки 4 (віброплатформа для перемішування порошку), що робило фіксованою зміну електронного та іонного струмів в осьовому напрямку. Негативний і позитивний потенціали на зонд подавалися від універсального джерела живлення 6 з регу-

льованими значеннями вихідного потенціалу 0–500 В. Розподіли плаваючого потенціалу вимірювалися за потенціалом зонда, з'єднаного послідовно з баластним опором $R_2 = 1$ ГОм, та цифровим вольтметром із вхідним опором $R_3 = 1$ МОм. Реостат R_1 обмежував струм на зонд у випадках раптового пробоя під час очищення зонда.

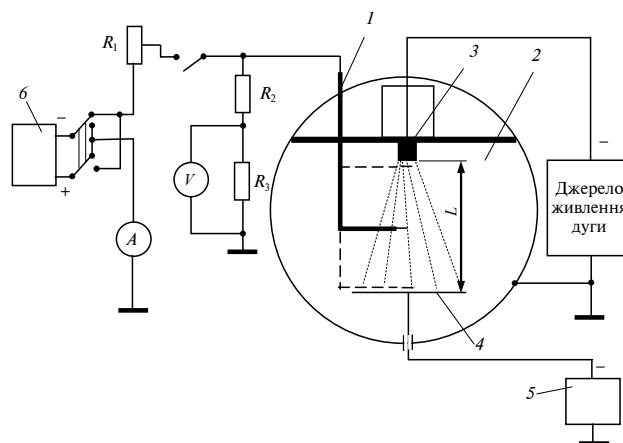


Рис. 1. Схема вимірювання вольт-амперних характеристик металеві плазми у вакуумній камері

Параметри плазми, а саме температура іонів T_i , температура електронів T_e , а також концентрація іонів N_i визначались за вольт-амперними характеристиками (ВАХ) зонда згідно з відомою методикою. Температура електронів визначалась як кутовий коефіцієнт напівлогарифмічної залежності електронної складової струму на зонд від його потенціалу. У подальшому за даними електронного струму можна буде знаходити температуру і концентрацію іонів [15–18].

Плазмове напилювання плакованого порошку здійснювалось на модернізованій установці з плазмотроном, чим забезпечувалась ламінарна течія високотемпературного газу; режими роботи: потужність – до 8 кВт, продуктивність – до 4 кг/год, робочий струм дуги плазмотрона – 110 А, напруга – 60 В; як плазмоутворюючий і захисний газ використовувався аргон із загальною витратою 6 л/хв.

Елементний склад отриманих плівок плакованих порошків, а також плазмових покриттів проводився методом локального мікрорентгеноспектрального аналізу на растрових електронних мікроскопах Camscan-4DV і ZEISS EVO 50XVP із застосуванням енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізатора в розширеному діапазоні детектованих елементів із використанням каліброваних еталонів.

Результати і обговорення експериментальних даних

А. Діагностика плазмового потоку. З катода (Ti, Al) відбувається емісія електронів і важких частинок у вигляді нейтральних атомів і іонів. Густина струму емісії електронів з катода описується складними формулами залежно від співвідношення між напруженістю електричного поля на катоді і температурою електронів, а також із врахуванням природи роботи електронів дугового розряду у вакуумі і енергії мікроривих, що відбуваються на поверхні катода [9, 10, 19].

За допомогою ВАХ було побудовано залежності іонного струму від відстані напилування L при різних режимних параметрах плакування (рис. 2), а також розраховано концентрації іонів Ti і Al по осі плазмового потоку на відстані від 20 до 320 мм (рис. 3).

Отримані дані свідчать про збільшення струму на зонді при підвищенні струму дуги, що веде до збільшення як позитивних, так і негативних носіїв заряду.

На основі експериментальних кривих, наведених на рис. 2, можна зробити висновок про різний характер випаровування титану і алюмінію. Так, при однакових умовах генерації плазми з алюмінієвого катода спостерігається більш інтенсивне зниження іонного струму, що свідчить про зменшення концентрації іонів. При плакуванні титаном проходить перерозподіл струмів на зонді при струмі дугового розряду 140 А і відстані 300 мм. При плакуванні алюмінієм перерозподіл струмів відбувається вже при струмі дуги 80 А на дистанції 210 мм.

Температури іонів відповідно до зазначеної вище методики [15] були розраховані залежно від електронної температури. Результати розрахунків зведені в табл. 1.

Таблиця 1. Залежність електронної і іонної температури металевої плазми (алюміній, титан) від струму дуги

I, A	T_e		T_i	
	Ti (катод)	Al (катод)	Ti (катод)	Al (катод)
60	1	2	0,06	0,12
80	1,65	3	0,083	0,173
100	2	4	0,11	0,24
140	2,75	6	0,157	0,325
200	3	6,7	0,16	0,38

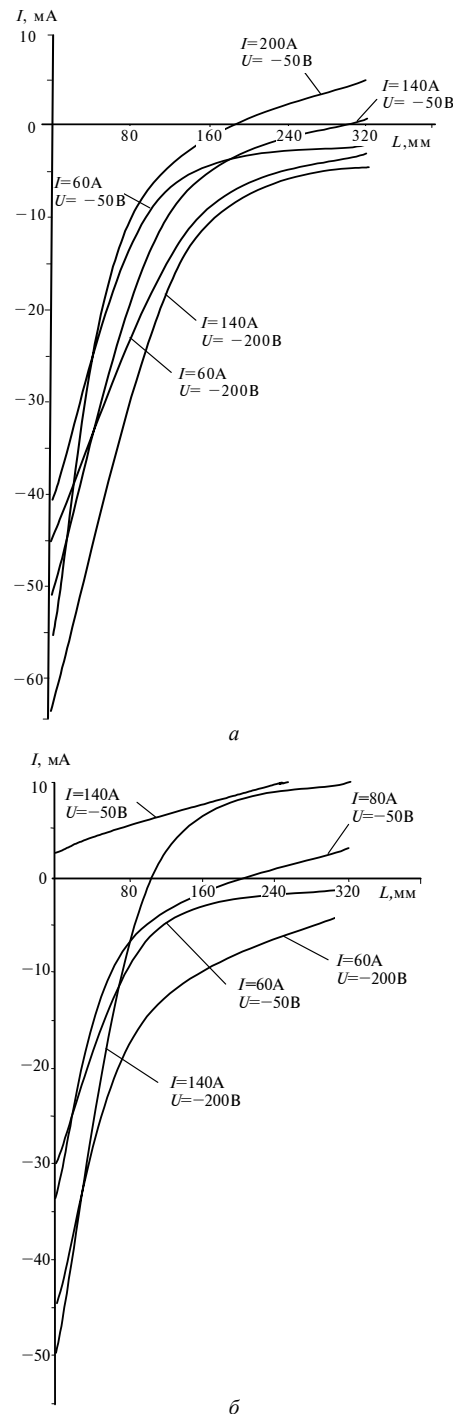


Рис. 2. Залежність іонного струму від дистанції напилування L при різних режимах плакування: а – для Ti; б – для Al

За результатами проведених експериментів зроблені відповідні висновки щодо визначення раціональних режимів випаровування і конденсації.

Встановлено, що оптимальним для генерації максимальної кількості іонів і мінімальної

кількості нейтральних частинок є струм 100–110 А для титану і 60–90 А для алюмінію при дистанції напилювання 240–320 мм і потенціалі зміщення 50 В.

На основі ВАХ було розраховано концентрації іонів по осі плазмового потоку (див. рис. 3), а також концентрації іонів залежно від струму дуги на дистанції напилювання 20, 180 і 320 мм (рис. 4).

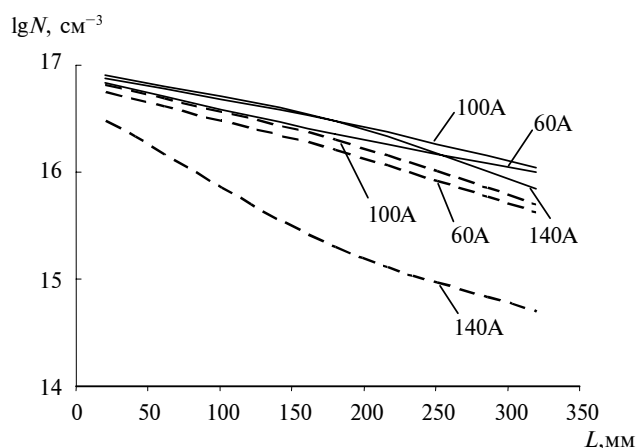


Рис. 3. Залежність концентрації іонів титану (---) і алюмінію (—) від дистанції напилювання для різних струмів дуги

З наведених графіків на рис. 4 видно, що концентрація іонів Ti відбувається в діапазоні $8 \cdot 10^{16}$ – $7 \cdot 10^{15}$ см^{-3} , а концентрація іонів Al – в діапазоні $6,5 \cdot 10^{16}$ – $0,5 \cdot 10^{15}$ см^{-3} залежно від дистанції напилювання. Концентрація іонів алюмінію різко знижується при збільшенні струму дуги вище 100 А, для титану така тенденція спостерігається на дистанції 320 мм.

Коректність вимірювань залежить від ступеня чистоти поверхні зондів, про що може свідчити вигляд ВАХ. Перед вимірюваннями проводилося очищення поверхні циліндричного зонда. При дослідженні плазми з концентрацією електронів, яка перевищує 10^{12} см^{-3} , для ефективного очищення поверхні зонда до нього прикладали напругу $U > -800$ В, завдяки чому здійснювалось бомбардування його високоенергетичними іонами плазми, що було достатнім для прожарювання зонда [15]. Спеціально проведені дослідження впливу забруднення поверхні зонда на його вольт-амперні характеристики при різних відстанях зонда від катода і часу витримки в потоці показали, що навіть при найжорсткіших умовах експерименту ВАХ починала спотворюватися тільки через час $t > 100$ с. Після цього повторювався процес очищення поверхні зонда.

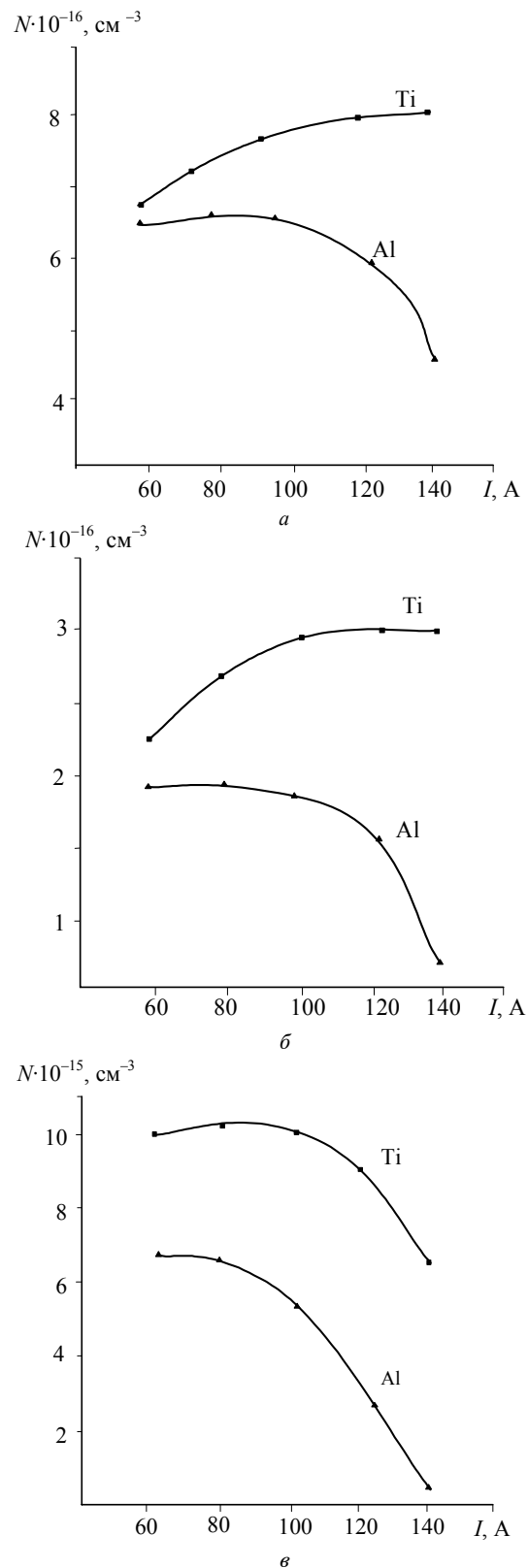


Рис. 4. Залежність концентрації іонів металів від струму дуги на різних дистанціях напилювання: а – 20 мм; б – 180 мм; в – 320 мм

Для підтвердження коректності вимірювань за допомогою запропонованого зонда було використано критерій, згідно з яким має виконуватися умова [16]

$$R_C \ll \lambda_i \left(\frac{T_i}{T_e} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

де R_C – радіус шару об'ємного заряду навколо зонда, який для оцінок можна вважати рівним радіусу зонда R_0 ; λ_i – довжина вільного пробігу іонів.

З врахуванням температури іонів і електронів, їх концентрації, ефективного перетину іонізації, а також тиску у вакуумній камері $p \approx 10^{-2}$ Па згідно із співвідношенням (1) отримуємо $\frac{\lambda_i}{R_0} \approx 100\text{--}600$ залежно від режиму розпилення.

Отже, умова (1) виконується, роботу зонда можна вважати коректною, і такий висновок збігається з результатами інших альтернативних досліджень, згідно з якими похибка вимірювань не перевищує 15–20 %.

Отримані результати можуть бути використані безпосередньо при плакуванні і розробці відповідних композиційних порошкових матеріалів.

Б. Взаємодія потоку металевої плазми з макрочастинками порошку. При взаємодії (ударі) з потоком заряджених частинок (іонів титану, алюмінію) макрочастинки порошку оксиду алюмінію, на які наноситься оболонка, можуть за рахунок передачі їм кінетичної енергії відхилятися (розсіюватися) від початкового положення на деяку відстань l . З технологічної точки зору важливо знайти умови, при яких таке відхилення було б неможливим або мінімальним.

Виходячи із законів збереження енергії і імпульсу, вирішуючи систему сумісності, знаходимо швидкість відхилення макрочастинки після взаємодії з потоком іонів (з іоном)

$$u_2 = 2v_1 \frac{m}{M+m} = v_1 \frac{2}{k+1}, \quad (2)$$

де $k = \frac{M}{m}$; v_1 , m – швидкість іона до зіткнення та його маса; u_2 , M – швидкість макрочастинки після зіткнення та її маса.

В той же час, враховуючи, що швидкість макрочастинки після взаємодії з потоком іонів

становить $u_2 = \frac{dl}{dt}$, а швидкість зміни імпульсу системи (макрочастинки) дорівнює діючій на неї силі $F = \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt}(mv)$, отримуємо рівняння для визначення l :

$$l = \int_{m_0}^{m_j} \frac{2v^2}{F} \frac{m}{m+M} dm. \quad (3)$$

У рівнянні (3) m_j – повний (максимальний) потік іонів, що падає на макрочастинку і визначається співвідношенням $m_j = \frac{N_i^{2/3} m_0 \pi d}{4}$, де N_i – концентрація іонів, см^{-3} ; m_0 – маса одного іона.

Для знаходження відстані відхилення l необхідно знати швидкість іонів і силу F , з якою вони діють на макрочастинки.

Швидкість іонів може бути обчислена на основі отриманих параметрів плазмового потоку за формулою

$$v = MC_i, \quad (4)$$

де M – число Маха ($M=3,5$ практично для всіх катодних матеріалів); $C_i = (5zT_e/3m_e)^{1/2}$ – швидкість іонного звуку.

Результати розрахунків швидкості іонів титану і алюмінію наведені на рис. 5, з якого видно, як зростає швидкість руху іонів із збільшенням струму дуги.

Значення сили F , що діє на частинку, були розраховані на основі експериментальних да-

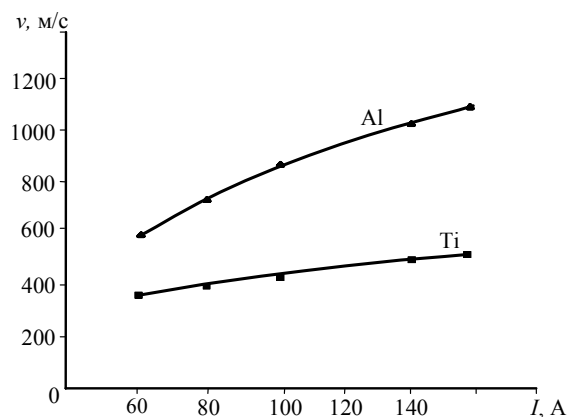


Рис. 5. Залежність швидкості руху іонів від струму дуги

них з визначення тиску плазмового потоку p . Для цього в середині вакуумної камери встановлювався пристрій важільного типу, що мав плоску пластину діаметром 150 мм, яка розміщувалась перпендикулярно плазмовому потоку. Таким чином, за відхиленням пластини вимірювався тиск металевої плазми p , що діє на частинки порошку в процесі плакування.

На рис. 6 наведено графічні залежності тиску плазмового потоку від струму дуги в осьовому напрямку потоку плазми на різних дистанціях напилування.

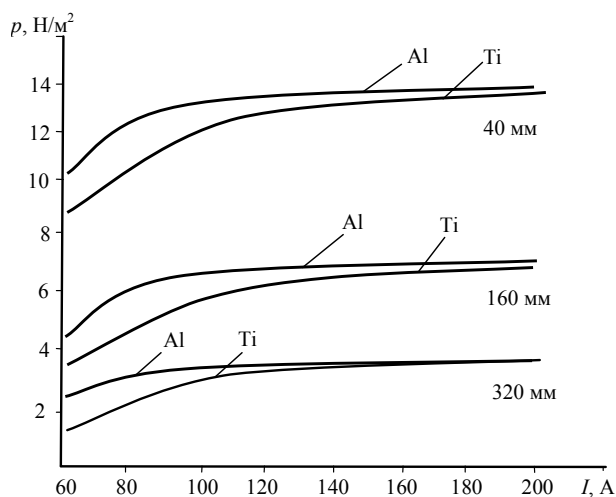


Рис. 6. Залежність тиску плазмового потоку від струму дуги і дистанції напилування

У свою чергу величина тиску плазмового потоку залежить від потенціалу зміщення, що подається на пристрій з порошком. Вплив потенціалу зміщення на тиск плазмового потоку залежно від току дуги наведено на рис. 7.

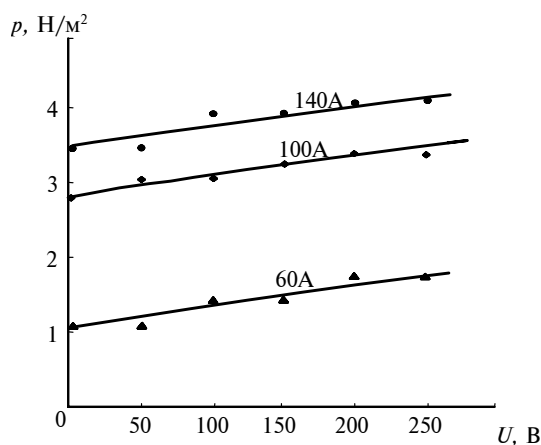


Рис. 7. Залежність тиску плазмового потоку від потенціалу зміщення струму дугового розряду

Отримані експериментальні і розрахункові дані свідчать про залежність основних параметрів плазмового потоку, насамперед від струму дуги, а саме — $\Phi(v, m_j, F) = f(I)$. Враховуючи

цю залежність параметрів потоку плазми, в рівнянні (3) згідно з даними рис. 4–7 можна перейти до нової змінної інтегрування (I). Результати розрахунків за рівнянням (3) величин розльоту (відхилення) l макрочастинок певного діаметра D , на які наноситься оболонка з іонів катодного матеріалу при відповідних параметрах осадження, залежно від діаметра цих частинок наведені на рис. 8.

Згідно з теоретичними розрахунками відхилення l частинок Al_2O_3 сильно залежить від концентрації, і найбільші відхилення при да-

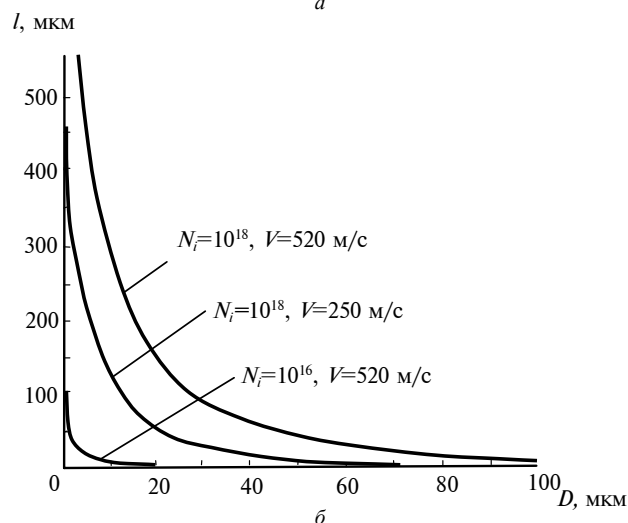
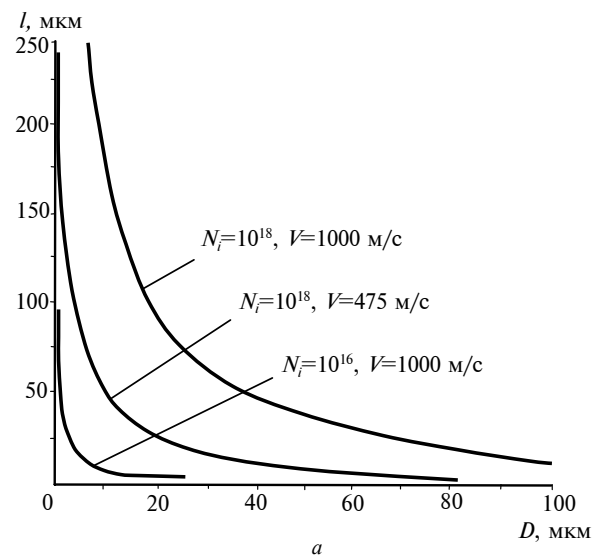


Рис. 8. Залежність можливого відхилення частинок порошку Al_2O_3 від розміру фракції макрочастинок (1–100 мкм), параметрів бомбардування потоком іонів: а — для алюмінію; б — для титану

них режимах роботи спостерігаються для частинок діаметром, меншим 1 мкм, тобто для ультрадисперсних порошків.

Наведені параметри плакування можна вважати оптимальними для порошків, що випробовувались у нашому випадку, тобто для частинок діаметром 40–60 мкм, коли експериментально не помічалось розпорошення порошку. В той же час, при випробуванні суміші порошків, які містять ультрадисперсні складові (діаметр ≤ 1 мкм), встановлено відхилення певної маси частинок за межі робочої ємності (віброплатформи), де перемішувався порошок. У цьому випадку розліт частинок становить більше 60 см, тобто він перевищує розміри металізаційної камери, і тому виникає необхідність зміни параметрів плазмового потоку і режимів плакування.

Таким чином, відхилення (розліт) частинок порошку, який плакується, може бути визначено як критерій для знаходження оптимальних режимів генерації металевої плазми, а також процесів формування покриттів для конкретних розроблюваних систем (частинка–оболонка).

В. Аналіз процесів формування плівок і покриттів. При напилюванні плазових покриттів із використанням плакованих порошків дуже важливим є характер зв'язку металевої оболонки з керамічним ядром. При слабкій взаємодії оболонка стягується в краплі, які під дією власної ваги і газового потоку можуть відриватися від поверхні частинки порошку, і це приводить до роздільного переносу металу і кераміки на поверхню матриці (основи). Тому для якісного газотермічного покриття важливим є правильний, оптимальний вибір параметрів при осадженні оболонки на поверхню макрочастинок.

Можна констатувати, що на процес плакування частинок порошку важливий вплив мають такі характеристики, як швидкість випаровування матеріалу катода і швидкість іонів металу, що осідають на поверхню частинок порошку. Крім того, швидкість нанесення на поверхню частинок порошку оболонки відповідної товщини залежить від кількості самого порошку, конструктивних елементів установки, способів і режимів перемішування порошку при плаванні. Максимальна кількість порошку заданої дисперсності, що завантажуються в пристрій для перемішування, пов'язана з можливостями випаровувача металу, при цьому на габарити пристрою в зоні металізації накладаються певні обмеження щодо умов вакуумної металізації. Ефективність плакування залежить як від при-

роди матеріалу, що наноситься, так і від технологічних режимів під час очищення (активації) оброблюваної поверхні в плазмі тліючого розряду або на стадії напилювання – іонного бомбардування. Процеси, що відбуваються в плазмі тліючого розряду, можуть протікати по-різному – залежно від умов і вибраних параметрів: тиску і складу газу, вкладки потужності, напруги і частоти електричного поля, сили струму, наявності і характеристик електромагнітних і магнітних полів, матеріалу і стану електродів, конструкції і геометричних розмірів камери і т.д.

У роботі процес активації підбирався, виходячи з режимів вольт-амперної характеристики тліючого розряду, а також конструктивних особливостей пристрою, де здійснюється перемішування порошку [14]. З метою покращення адгезії плакованого шару поверхня частинок активувалася двома етапами. На першому етапі попередньо нагрівались частинки порошку до 400 °С впродовж 30 хв. Такий режим на першому етапі дає змогу видалити хемосорбовану вологу і тонкі поверхневі забруднення без розігріву частинок порошку. На другому етапі проводилась обробка іонами тліючого розряду з енергією 0,8–1 KeV безпосередньо в металізаційному пристрої. Процес здійснювався протягом 10–40 хв за схемою анод–камера, катод–пристрій, що перемішує, за плазмоутворюючий газ було вибрано аргон. Обробка поверхні оксиду алюмінію в тліючому розряді значно збільшує міцність зчеплення з основою як алюмінієвих, так і титанових вакуумних плівок. Роль тліючого розряду зв'язана не стільки з нагріванням, скільки з утворенням на поверхні під дією іонного бомбардування вільних зв'язків, дефектів і заряджених центрів.

Негативним фактором у процесі плакування в окремих випадках може стати висока температура на поверхні частинок, в результаті чого частинки порошку активно злипаються, утворюючи конгломерати. На зростання температури насамперед впливає збільшення сили струму дугового розряду, однак це ж приводить до збільшення концентрації і підвищення продуктивності процесу. Для більш рівномірного розподілу температури по всій порошковій масі застосовувалися спеціальні засоби: активне перемішування і накладання вібрації на порошок.

Металографічний аналіз плакованих порошків, а також покриттів, отриманих газотермічним напиленням, дав можливість зробити

висновок, що металева оболонка на частинках характеризується високою щільністю і рівним рельєфом поверхні, а саме напилене покриття відрізняється підвищеною когезійною і адгезійною міцністю. На рис. 9, 10 зображено металографії порошку і напиленого плазмового покриття (електронне зображення), а в табл. 2 і 3 наведено результати хімічного аналізу.

Таблиця 2. Хімічний аналіз порошку Al_2O_3 , плакованого титаном і алюмінієм

Спектр, відхилення	O, %	Al, %	Ti, %
Спектр 1	41,72	47,04	11,24
Спектр 2	37,52	48,31	14,17
Спектр 3	23,85	55,61	20,54
Спектр 4	22,23	58,54	19,23
Середнє	31,33	52,38	16,29
Стандартне	9,75	5,58	4,35
Максимальне	41,72	58,54	20,54
Мінімальне	22,23	47,04	11,23

Таблиця 3. Хімічний аналіз покриття на основі порошку Al_2O_3 , плакованого титаном і алюмінієм

Відхилення для спектрів 3–10	O, %	Al, %	Ti, %	Fe, %
Середнє	41,47	46,63	6,34	5,56
Максимальне	52,09	64,4	7,50	26,38
Мінімальне	21,77	36,6	5,08	0,21

Як вже зазначено вище, крім основних параметрів вакуумної металізації (ступінь вакууму, сила розрядного струму дуги, величина прикладеного потенціалу) при металізації порошків процес додатково характеризується такими величинами, як швидкість випару металу V_v , швидкість конденсації V_k , коефіцієнтом використання парів металу $K_{в.м}$, швидкістю нанесення металу на порошок V_n , яка визначає продуктивність процесу і склад композиту, ефективною швидкістю росту товщини оболонки на частинках V_e , що використовується для оцінки ступеня впливу на метал оболонки молекул окиснювачів (O_2 , H_2O), що є в залишковій атмосфері вакуумної камери. Використовуючи швидкість випаровування матеріалу, товщину оболонки або масу металу u , що конденсувався на поверхню частинок порошку масою M_n , можна орієнтовно розрахувати час плакування:

$$\tau = \frac{u M_n}{V_v K_{в.м}}. \quad (5)$$

Якщо врахувати конструктивні особливості перемішувального пристрою, то час плакування для створення оболонки товщиною h на частинках порошку можна визначити за виразом

$$\tau = \frac{S_0 h}{S_n k V_k}; \quad (6)$$

тут S_0 – питома поверхня сферичних частинок порошку; S_n – площа поверхні віброплатфор-

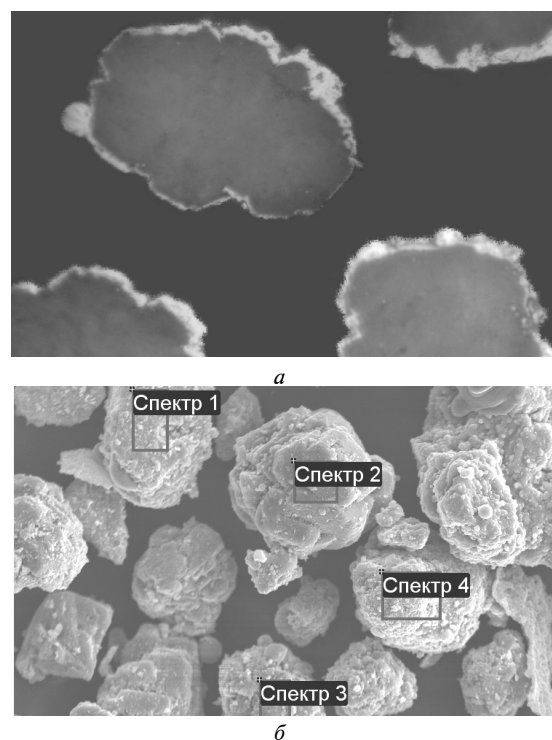


Рис. 9. Частинки плакованого порошку Al_2O_3 : а – оптична мікроскопія, $\times 500$; б – електронне зображення, $\times 800$

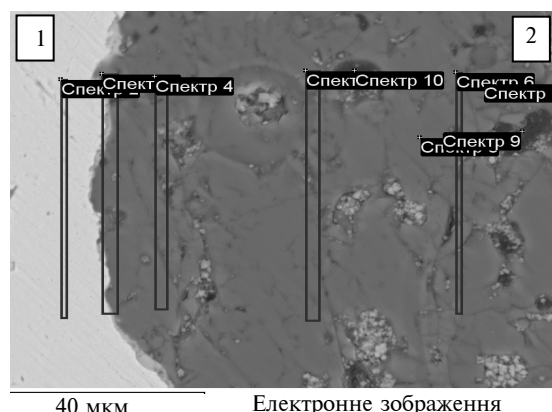


Рис. 10. Електронне зображення плазмового покриття на основі порошку Al_2O_3 , плакованого титаном і алюмінієм: 1 – матриця; 2 – покриття, $\times 800$

ми; V_k — швидкість конденсації парів металу на поверхневому шарі порошку; k — коефіцієнт перекриття поверхні віброплатформи шаром порошку; $k = \frac{S'_n}{S_n}$, де S'_n — площа поверхні віброплатформи, яка покрита шаром порошку.

Як видно, для заданих умов металізації швидкість і час металізації залежать від величини завантаження порошку і продуктивності випаровувача. Аналіз показує, що при швидкості випару металу $V_v = 1$ г/хв (при $S_n = 1256$ см² і $k = 0,9$) для отримання на порошок загальною масою 350 г, дисперсністю 40 мкм оболонки товщиною $h = 2$ мкм тривалість плакування для алюмінію становить 55 хв, для титану — 84 хв.

Висновки

Проведеними дослідженнями визначено концентрації іонів та розподілення іонного струму в металевій плазмі титану і алюмінію, що дає можливість здійснювати регулювання процесу конденсації у вакуумі металевих плівок на порошкові матеріали, зокрема керамічні. При цьому встановлені значення струму дугового розряду, потенціалу зміщення забезпечують максимальну концентрацію іонів і

формування рівномірної оболонки на частинках порошку для відповідної відстані до катода.

Розраховано і експериментально досліджено розліт (відхилення) частинок порошку в процесі конденсації іонів металу при формуванні оболонки і знайдено умови, при яких таке відхилення буде неможливим або мінімальним, що дуже важливо з технологічної точки зору.

Відхилення частинок порошку в процесі плакування може бути прийняте як критерій для визначення раціональних режимів генерації металеві плазми при плакуванні порошків, що зумовлює в подальшому ефективність процесів формування газотермічних покриттів.

Отримані в результаті експерименту дані мають практичну цінність для визначення оптимальних режимів випаровування і конденсації при формуванні як оболонок на сферичних поверхнях, так і покриттів взагалі.

У перспективі планується проведення і удосконалення досліджень процесу вакуумної металізації порошкових матеріалів у віброкиплячому шарі, що сприяє підвищенню ефективності перемішування порошку, отриманню більш рівномірної та суцільної оболонки на порошкових матеріалах.

В.И. Копылов, И.В. Смирнов, И.А. Селиверстов

ПРОЦЕССЫ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПЛАКИРОВАНИЯ ПОРОШКОВ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Исследованиями определены основные параметры металлической плазмы титана и алюминия, генерируемой катодным пятном вакуумной дуги. Рассмотрена динамика заряженных частиц плазмы и их взаимодействие с частицами порошка. Определены режимы конденсации металлических пленок на поверхности порошковых керамических материалов в вакууме.

V.I. Kopylov, I.V. Smirnov, I.A. Seliverstov

THE PROCESSES OF ION-PLASMA CLAD OF POWDERS FOR THERMAL SPRAY COATINGS

We reveal the basic parameters of the titan and aluminum metallic plasma, generated by the cathode stain of a vacuum arc. We also consider the dynamics of the charged particles of plasma and their interaction with the powder particles and determine the condensation parameters of metallic tapes on the surface of powder ceramic powder ceramic materials in the vacuum definite.

1. Вишенков С.А. Химические и электрохимические способы осаждения металлопокрытий. — М: Машиностроение, 1975. — 312 с.
2. Плакирование порошков тугоплавких соединений методом химического осаждения / В.В. Ваченко, О.Н. Голубев, С.П. Светухин, А.Г. Цидулко // Тем-

пературоустойчивые функциональные покрытия. — Тула: Наука, 1985. — С. 131–134.

3. Хамова Т.В., Шилова О.А., Голикова Е.В. Исследование структурообразования в золь-гель системах на основе тетраэтоксисилана // Физ. и хим. стекла. — 2006. — 32, № 4. — С. 615–631.

4. *Костржицкий А.И., Лебединский О.В.* Многокомпонентные вакуумные покрытия. — М.: Машиностроение, 1987. — 208 с.
5. *Газотермические* покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.П. Артадовская. — К.: Наук. думка, 1987. — 544 с.
6. *Мовчан Б.А., Малащенко И.С.* Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — К.: Наук. думка, 1983. — 232 с.
7. *Бобков В.В., Глушко В.И., Рябчиков Д.Л. и др.* Конденсация металлических пленок на дисперсных материалах // Физические явления в твердых телах: Матер. 3-й Междунар. конф., 1997. — Харьков, 1997. — С. 179.
8. *Алимов С.С., Бобков В.В., Рябчиков Д.Л., Старовойтов Р.И.* Металлизация порошков // Физика плазмы и плазменные технологии: Матер. II Междунар. конф. "Физика плазмы и плазменные технологии (ФППТ-2)", г. Минск, 1997. — Минск, 1997. — С. 724.
9. *Хороших В.М.* Стационарная вакуумная дуга в технологических системах для обработки поверхностей // Физическая инженерия поверхности. — 2003. — 1, № 1. — С. 19–26.
10. *Денбовецкий С.В., Барченко В.Т., Шмырева Л.Н.* Физические основы генерации плазмы в ионно-плазменных устройствах технологического назначения: Учеб. пос. — К.: УМК ВО, 1989. — 152 с.
11. *Пустотина С.Р., Новиков Н.Н., Глухова П.К. и др.* Исследование свойств металлизированных порошков тугоплавких соединений и плазменных покрытий на их основе // Температуроустойчивые покрытия: Тр. XI всесоюз. совещ. по жаростойким покрытиям, Тула, 1983. — Л.: Наука, 1985. — С. 157–161.
12. *Новиков Н.Н.* Особенности поведения дисперсных материалов при их металлизации в вакууме / Рук. деп. Укр. НИИ НТП от 12.09.87. — 20 с.
13. *Шаронов Е.А., Ванновский В.В., Алексеев С.В.* Вакуумно-дуговое напыление меди на порошок керамики $\text{SiO}_2\text{—FeO}_n$ // Тр. 6-й Междунар. конф. "Пленки и покрытия — 2001". — СПб.: СПбГТУ, 2001. — С. 146–149.
14. *Копылов В.И., Смирнов И.В., Селиверстов И.А., Давыдов А.А.* Исследования параметров плазменных потоков вакуумного дугового разряда при плакировании порошков // Пробл. техники. — 2008. — № 1. — С. 63–78.
15. *Черняк В.Я., Лебедев Д.О.* Осевые распределения параметров плазмы несамостоятельного разряда, стимулированного плазменным потоком // Плазмотехнология -97: Сб. науч. тр. — Запорожье, 1997. — С. 154–157.
16. *Козлов О.В.* Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969. — 292 с.
17. *Алексеев Б.В., Котельников В.А.* Зондовый метод диагностики плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 240 с.
18. *Котельников В.А., Котельников М.В.* Цилиндрический зонд в потоке медленно движущейся столкновительной плазмы // ТВТ, 2008. — 46, № 3. — С. 342–346.
19. *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. — М.: Наука, 2000. — 424 с.

Рекомендована Радою
зварювального факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
25 грудня 2008 року